

热力学中的错误概念

刘正荣

ZJL@CS.Stanford.EDU

此内容由人工智能(AI)辅助翻译,若未达意,请查阅[原文](#)

摘要

热力学中一些根深蒂固的误解,至今仍在妨碍人们对基本原理的深入理解,尤以温度、相变、热胀冷缩、绝对零度、布朗运动、克鲁克斯辐射计的转动现象,乃至热力学第二定律等领域为甚。其中最普遍的一种错误观点,是将温度简单地等同于粒子运动平均动能的量度。作为七个基本物理量之一,温度在各类物理现象中扮演着核心角色。对其本质的误解不仅局限于热力学,还波及电阻、超导、超流等多个领域,造成概念混淆和理论偏差。例如,经典气体动力学理论在该温度观的基础上,系统性低估了多原子气体的比热,与实验结果长期不符,引发科学界长达数百年的争议。本文综合多领域研究成果,尝试构建一个统一的分析框架,以更准确地理解这些基础概念,进而澄清热力学及其相关学科中长期存在的概念模糊与理论困境。

前言

热力学中的若干误解早已根植于学界与教育体系之中,常以“常识”之姿出现在教材与教学内容中。例如,温度作为七大基本物理量之一,通常被解释为系统中粒子平均动能的标志;热胀冷缩被归因于分子振动增强所导致的体积扩展;相变则被描述为分子热振动强度增加、最终破坏分子键的过程;布朗运动被视为粒子在流体中受到分子随机碰撞的结果。然而,越来越多的研究表明,这些广为接受的解释实则存在本质性的偏差。

上述误解不仅影响了对具体现象的解释,而在更深层次上扭曲了人们对物理规律的理解,进而阻碍了理论构建与技术创新。例如,电阻常被认为是电子在导体中与晶格振动或杂质发生碰撞散射所致,且该过程在高温下尤为显著。为解释超导现象,即零电阻状态,BCS理论提出电子可通过电子-声子相互作用形成库珀对^[1],在晶格中避免散射,从而降低电阻,实现超导。传统观点认为,电子-声子相互作用只能在极低温(通常低于40K)下有效,因为高温下晶格热振动增强,会破坏库珀对的稳定性,从而终结超导状态。

然而,高温超导体的相继发现正在挑战这一理论框架。这些材料常需在高压条件下才能呈现超导性。自1986年以来,发现很多材料能在远高于BCS理论预期的温度下观察到超导现象^[2-6]。当前的记录保持者为十氢化镧,其在高压下的超导临界温度已达250开尔文^[7]。尽管实验表明高压有助于超导,但现有理论仍无法解释压力在其中所起的正面作用,这暴露出BCS理论在高温高压条件下的适用性缺失和理论局限。

尽管超导现象已被发现逾百年,真正实用的室温超导体仍未问世。BCS理论虽在超导研究发展中具有里程碑意义,但其建立在若干可能源自温度本质误解的假设基础上。传统上对电阻的解释源于电子与晶格之间的散射,而该过程的热力学背景则深

受“温度即粒子动能”的观念所主导。这些底层的认知偏差，或已在不自觉中影响了科学的研究方向，延缓了理论与应用层面的突破。

这一系列的问题表明：基本概念的准确性对科学认知与技术进展具有决定性作用。本文梳理了多个领域中纠正基础性误解的研究成果，并尝试提出一种更为一致且精确的理论视角，以推动热力学及相关学科的深层次反思与未来发展。

气体动力学理论的局限性

若将系统温度视为粒子运动的平均动能，则温度和动能的变化可用于利用气体动力学理论预测系统的比热容。理想气体中单个分子的平均动能可由气体动力学理论推导，具体如下^[8-11]：

$$(1) \quad K = \frac{3}{2}k_B T$$

其中，T表示系统的绝对温度， k_B 为玻尔兹曼常数。比热是指使单位质量的物质温度升高一度所需的能量。基于此，气体动力学理论可用下式预测理想气体的摩尔比热：

$$(2) \quad C_m = \frac{K N_A}{T} = \frac{\frac{3}{2}k_B T N_A}{T} = \frac{3}{2}R$$

其中， C_m 表示气体动力学理论预测的摩尔比热容， N_A 为阿伏伽德罗常数，R是气体常数。理论值可直接与实验数据进行比较。对于由单原子分子组成的气体，气体动力学理论预测的比热与实验数据高度吻合，准确率约为99%，且与原子质量无关。然而，对于多原子分子气体，理论预测值普遍低于实验测量值，且分子结构越复杂，差异越大。例如，辛烷的理论比热仅为实验值的7%，误差高达93%。

为弥补这一差距，在气体动力学理论模型引入了额外的动能形式：粒子的平动能、振动能和转动能。麦克斯韦提出三种运动模式之间能量均分的假设^[12]，使理论预测的能量提高了三倍。但即便如此，模型依然无法完全解释实验中的偏差。玻尔兹曼通过引入自由度的概念，对能量均分原理进一步改进，认为气体的能量在所有可及的自由度间均分^[13-14]。随着分子中原子数的增加，自由度从三增加到七，具体取决于分子复杂程度。因而，理论比热也随分子结构的复杂度而调整。为使理论与实验结果相符，学者们提出了各种修正方案^[15-16]。这一问题长期困扰热力学领域，成为经典难题之一。针对能量均分原理失效的原因，众多解释被提出。玻尔兹曼曾指出气体可能未达到热平衡状态^[17]。普朗克和爱因斯坦引入零点谐振子概念，以解释观测偏差^[18-19]。开尔文最终质疑能量均分假设的正确性^[20-21]，该观点后来也被爱因斯坦所认可^[22-23]。

温度能否代表动能？

如果温度仅是动能的量度，那么按照这一定义，比热容应完全源于动能的变化。在此前提下，由于气体分子具有更高的运动自由度，其比热理应高于液体。然而，实验结果却与这一预期相矛盾：多数物质在液态时的比热容反而更高。例如，液态水的

比热几乎是水蒸气的三倍。这一反差，以及实验测得比热与气体动力学理论预测值之间长期存在的偏差，均对“温度仅反映动能”这一基本假设提出了质疑。这个理论前提是否存在根本性的谬误？

造成上述偏差的共同因素，是分子键的存在。液态水比热容较高，归因于广泛存在的分子间的氢键；而理论与实测偏差显著的多原子气体，则包含多个分子内化学键。这些现象表明，分子间与分子内的化学键在热容中扮演了重要角色，其贡献远超动能所能解释的范围。

势能源自粒子间的相互作用，例如电子与原子核之间的静电作用。化学键作为能量的储存形式早已被认知，通常以焓来度量的。无论是分子间还是分子内部的键，都可视为储能装置，就像弹簧，外部做功使原子或分子间距拉伸时，能量以势能形式储存在键中。

这一认知与比热的实验趋势高度一致：气体动力学理论能较准确地预测不含内部化学键的简单气体的比热容，而当分子中化学键数量增加时，理论预测与实测数据之间的偏差也随之增大。尤其在将摩尔比热与分子中键的数量进行对比时，这一趋势更为明显。图1展示了部分气体的摩尔比热与其分子中化学键数量之间的相关性^[24]。

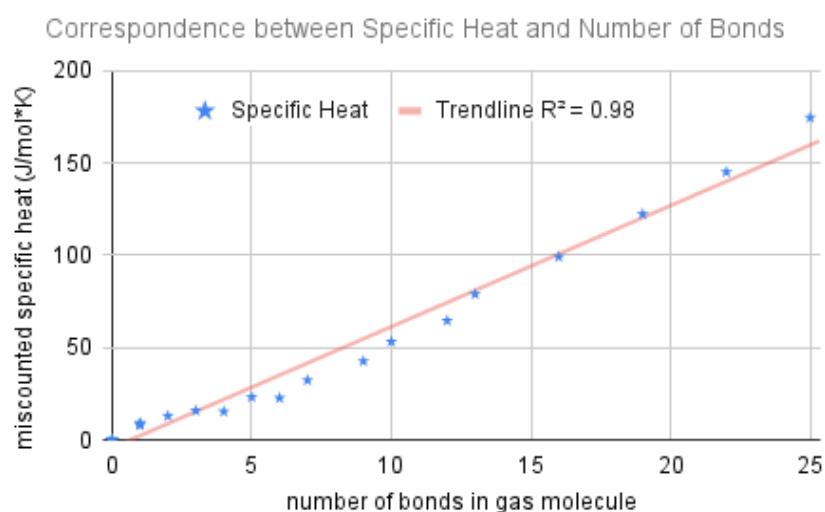


图1：气体分子摩尔比热与分子内化学键数量之间的相关性。图中每个数据点代表一种气体。“偏差摩尔比热”是指实验测得值与气体动力学理论预测值之间的差值。拟合曲线显示出显著的线性关系，拟合优度R²高达0.98。

基于上述观察，可以得出以下重要结论：系统吸收的比热主要分配于动能和势能两部分。气体动力学理论所预测的部分对应动能贡献，在不同单原子气体中均保持较高准确性，且不受分子质量或复杂程度影响，表明基于能量均分的修正可能并非必要。其余比热能量主要用于增加分子键中储存的势能，且随键数增加而增多。

显然，温度代表的不完全是动能，因为比热中相当一部分用于改变势能。虽然少量的比热能可能用于辐射增强或电子激发，但在现有实验精度范围内，这部分影响可忽略不计。

温度与势能的关系

上述观察对传统将温度视为动能标志的观点构成了严峻挑战，从而引发一个关键问题：温度是否更直接反映了系统的势能？然而，在实际应用中，许多温度计，尤其是红外测温仪，并不直接测量动能或势能，而是通过检测物体发出的辐射能来确定温度，无需与目标接触。

理想黑体辐射特征由普朗克定律描述，该定律揭示了辐射强度随波长和温度变化的谱分布关系^[25-27]。普朗克定律推导出一个重要结果：理想黑体所发出的总辐射功率P与其绝对温度T的四次方成正比，即斯特藩—玻尔兹曼定律所表达的关系^[28-29]。通过变换该方程，可以将温度表示为系统辐射功率的函数形式：

$$(3) \quad T = \sqrt[4]{\frac{P}{p}}$$

其中，p表示斯特藩—玻尔兹曼常数。该关系表明，温度可通过系统发出的辐射功率来确定，构成了现代非接触式测温仪器设计技术的理论基础。普朗克辐射定律的另一个重要推论是维恩位移定律，该定律指出：辐射强度的峰值波长与绝对温度成反比：

$$(4) \quad T = \frac{b}{\lambda}$$

其中，λ表示辐射曲线的峰值波长，b为维恩位移常数。该关系表明，系统的温度可通过其辐射峰值波长测定。例如，经验丰富的面包师可通过火焰颜色判断炉温；同样，太阳的峰值辐射波长约500纳米，据此可推算其表面温度约为5,778卡尔文。这些实例表明，温度与辐射能之间存在直接的物理联系。

辐射过程本质上涉及系统势能的变化。例如，加速运动的带电粒子（如电子在原子轨道间跃迁）会以辐射形式释放能量；相反，当辐射被吸收时，电子跃迁至高能轨道，吸收的能量转化为势能。分子间和分子内的化学键也会通过势能变化吸收或释放辐射能。例如，在化学反应中，键的断裂或形成会释放或吸收热量；相变过程中，分子间作用力的变化同样导致潜热的释放或吸收。

因此，辐射能可视为势能转化的结果，体现了二者之间的内在联系。这一观点有助于理解如图1所示的气体比热与其化学键数量之间的相关性。由此可见，温度通过测量辐射水平与势能密切相关。因此，温度本质上更是系统辐射状态与势能水平的标志，而非单纯的动能体现。

粒子动能从何而来？

系统中的动能究竟扮演着怎样的角色？又是如何产生的？这一问题可通过一种称为“跃迁冲击”(transimpact)的机制加以阐述^[30]。分子之间通常存在静电引力，但当距离过近时，价电子之间的排斥作用会急剧增强。这两种相反的力在某一特征距离处达到平衡，从而形成稳定的结构。然而，当电子发生轨道跃迁时，这一平衡可能被打破，从而引发系统的剧烈变化。

电子吸收能量后，通常在数纳秒甚至更短时间内跃迁至更高能级轨道^[31-32]。随着电子云膨胀，原子体积增大，导致与相邻原子间距骤然缩短。这一突发性的距离变化破坏了原有的静电平衡，往往导致排斥力迅速增强，将原子相互推开。该动态过程如图2所示，称为跃迁冲击。

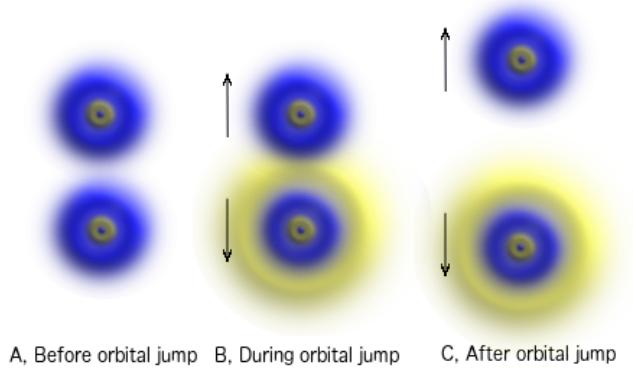


图2: 电子轨道跃迁引发的跃迁冲击

跃迁冲击过程类似爆米花突然爆裂，是一种剧烈的瞬间爆发，推开相邻粒子，赋予其动量，进而启动或增强其运动。这类过程由原子层面的电子跃迁所驱动，广泛存在于微观世界，在热力学过程中尤为关键。从根本上讲，粒子的动能源于辐射能的输入，体现的是系统势能的动态转化。

动能向势能及辐射能的转化

跃迁冲击(transimpact)促进了系统内动能的积累，但动能不可能无限增长。必须存在一种互补机制，将动能转化为其他能量形式，这一过程称为冲击跃迁(impactrans)^[30]。在冲击跃迁中，粒子(如分子、原子或亚原子粒子)的运动或振动通过静电作用引发碰撞，激发电子跃迁至更高轨道，甚至使电子逸出，改变其势能状态。同时，电子加速运动可能伴随辐射能释放。冲击跃迁将动能转化为势能和辐射能，维持系统的动态能平衡。

动能通过冲击跃迁转化为势能和辐射能的现象在日常生活中普遍存在。典型例子如锤击物体表面形成凹陷，键结构因受力而改变，一部分键被压缩，另一部分被拉伸，吸收锤子的动能并转化为势能，同时部分势能以辐射热形式释放，即我们常说的撞击热，实质这是大量粒子参与的冲击跃迁过程。

搓手取暖的摩擦生热亦是冲击跃迁的表现，表面运动的动能通过粗糙界面传递至粒子间相互作用。同理，气筒底部的发热源于分子碰撞频率增加，导致冲击跃迁事件增多。静电现象中，塑料棒与毛皮摩擦使电子逸出，电荷积累，亦是冲击跃迁的体现。

综上，跃迁冲击与冲击跃迁共同推动辐射能、势能与动能的相互转化。热量传递宏观主要依赖传导、辐射和对流三种方式。其中辐射传递能量，对流传递能量和物质。然而，传导机制尚不完全清楚。跃迁冲击和冲击跃迁为理解传导过程提供了新的理论框架，填补了长期以来对该过程认知空白。

温度反映动态能

热能，通常称为热量，传统上被定义为物质粒子所有动能的总和，包括平动、转动和振动等运动形式。温度通常被视为热能的指标，具体而言，是系统内粒子平均动能的标志。然而，上述研究表明，这些传统定义存在局限，忽视了势能和辐射能的重要贡献。

实际上，势能、辐射能与动能并非彼此孤立，而是在系统内部持续相互转化。辐射能和势能通过电子跃迁相互交换，跃迁冲击将辐射能转化为势能和动能，而冲击跃迁则使动能转化为势能和辐射能。三者共同构成系统内能中“**动态能**”(dynamic energy)的核心部分。尽管这三种能量均影响温度，但温度最直接反映的是辐射能，辐射能源于势能；动能则通过与辐射能和势能的正相关间接影响温度。为体现三者的相互关系，定义动态能为三者之和^[33]：

$$(5) \quad T = R + U + K$$

其中，T表示系统的动态能，包括辐射能R、势能U和动能K。这三种能量形式之间的持续转换驱动着系统的动态演化。因此将它们统称为动态能，突显了其内在的交互性与变化性，为理解热力学提供了新的理论基础。

温度反映了系统的辐射强度，与作为辐射主要来源的势能密切相关。通过跃迁冲击和冲击跃迁，动能不断与辐射能和势能交换，从而间接影响了温度。在这一框架下，温度即为系统整体动态能水平的量度。

热膨胀中的认识误区

传统教材常将热膨胀归因于分子振动增强，认为温度升高会使粒子振动更剧烈，从而“占据”更多空间。如果仅凭振动强度决定体积，那么物质体积应随温度持续增加，因为振动通常随热量增强。然而，该解释无法解释如水在摄氏0至4度范围内的热收缩现象。水在温度升高至摄氏4度前反而收缩，密度达最大后才再次膨胀，这一行为与基于振动的模型明显矛盾，反映出其基本假设存在问题。

实际上，热膨胀本质上源于分子间或分子内键结构的变化^[34]。为吸收热能，化学键发生拉伸，导致体积增加。这一变化可在两个层面体现：其一，晶体因晶格的各向异性，热膨胀可能表现出不同方向差异；其二，热膨胀系数通常与分子结构复杂程度相关，结构越复杂，键的柔性越高，越能吸收能量并产生明显膨胀。

影响体积的并非仅是键长变化，更包括整体键网的重构。这一机制解释了某些异常行为，如水在摄氏4度附近的热收缩。氢键在水中形成强烈的分子间吸引力，随着温度降低，氢键缩短、增强，使分子更紧密排列，导致体积减小。然而在接近摄氏4度时，氢键足够强大形成分子间的支撑网状骨架结构，使水分子形成低密度、空心的排列状态，类似雪花晶体。此后，尽管温度继续下降，氢键主导的结构变化反而使体积增加。此时，结构重组的体积效应超过了键长缩短带来的收缩趋势，成为主导因素。

热膨胀本质上源于键结构的变化，而键结构则由粒子间的相互作用力决定。需要指出的是，粒子间的吸引力不仅体现在原子或分子之间的化学键中，也包括电子与其宿主原子核之间的静电引力。因此，即使是缺乏分子键的单原子物质，也会表现出热膨胀现象，且由于其原子结构对称，通常呈现各向同性。相比之下，具有复杂或各向异性键结构的材料（如晶体）则往往出现不对称的热膨胀或收缩。这类方向性的变化难以用传统基于振动的模型充分解释，凸显了建立以键合动态为核心的更全面理论框架的必要性。

相变的起因

另一个常见的误解是认为相变主要由温度升高引发的分子振动增强所导致。实际上，分子振动是跃迁冲击的结果，而非其根本原因。相比之下，跃迁冲击具有更高的动量和更本质的作用，是动能的真正传递机制。在多数情况下，结构中的键在分子振动足以引发断裂之前，便已被跃迁冲击所破坏。因此，将相变简单归因于振动强度上升并不准确。从根本上讲，相变应理解为三种关键作用力之间的动态平衡：外部压力P、维持分子结构稳定的键合力B，以及破坏分子结构的跃迁冲击力T^[35]。

在低温下，跃迁冲击力T通常小于键合力与外压之和(B+P)，系统结构因此保持稳定。随着温度升高，跃迁冲击的平均强度逐渐增加，而由于分子间距扩大，键合力往往趋于减弱。当跃迁冲击力增大至足以抵消并超越(B+P)时，结构稳定性被破坏，相变随之发生。这一临界状态可由三力之间的平衡条件加以描述：

$$(6) \quad T(t, d) = B(d) + P$$

这一关系揭示了特定物态下键合强度的极限。随着系统能量的增加，分子间的键合力逐渐无法抵御跃迁冲击增强的破坏力。当键被破坏时，分子从固定位置解放，发生相变。在此过程中，系统吸收潜热，能量用于破坏分子键并提升已解放分子的动能，而非升高温度。类似的平衡关系同样存在于气体向等离子体的转变中。此时，主导键合力变为电子与原子核之间的静电引力，跃迁冲击则表现为原子内的电子跃迁，导致原子电离，即电子被剥离出轨道。

需要强调的是，公式(6)描述的是维持力（如压力与键合力）与破坏力（跃迁冲击）之间的动态平衡。通常该平衡在高温下因键合力减弱而被打破，但在较低温度时，若跃迁冲击足够强烈，也能突破较强的键合力，导致分子从表面逸出，产生升华或蒸发现象。类似机制还体现在光电效应中^[36]，高能光子可在低温下将电子激发逸出，尽管不引发等离子体相变。因此，相变可分为两类：受分子键限制型（bond-limited）与跃迁冲击驱动型（impact-driven），详见表1。

	固体到液体	液体到气体	气体到等离子体
受分子键限制相变（高温）	融化	沸腾	电离
跃迁冲击驱动相变（低温）	升华	蒸发	光电效应

表1：受分子键限制相变与跃迁冲击驱动相变的比较

前者为常规相变，发生在高温且临界明确时，键结构达到极限而失去稳定性；后者则由高强度跃迁冲击引发，虽温度未达传统相变点，但足以突破键合限制，导致局部或整体结构变化。

恒温相变

传统教科书通常认为，相变过程中吸收的潜热全部用于破坏分子间键，粒子动能没有变化，因此温度保持不变。然而，这一观点基于温度直接反映粒子平均动能的假设，而本研究表明，这一假设可能存在根本性错误。

以冰融化为例，分子从氢键网络的固定位置解放，运动性增强，动能理应增加。若温度真能反映平均动能，理应在相变时上升，但实际温度保持不变，这便形成了矛盾。

结合前述分析，这一矛盾不难理解：当系统输入能量后，电子跃迁至更高轨道，使原子间距增大，分子间键被拉伸且逐渐减弱。与此同时，温度上升，反映的是受拉伸键发出的辐射增强；系统动能也随跃迁冲击增强而增加。

温度在相变中保持恒定，主要因为分子间键的拉伸达到了极限，形成“锚定效应”^[35]。随着能量持续输入，键积累潜能并逐渐达到极限，最终被跃迁冲击破坏，标志相变开始。此时系统的势能稳定在极限势能水平，发射的辐射强度保持不变，温度作为辐射的体现，也随之稳定。

相变时潜热既用于破坏分子键，也用于提升分子的动能。粒子动能确实增加，反驳了动能不变的传统观念。但这些动能的变化不影响辐射强度，因而不反映在温度上。断裂的键本身亦不改变辐射水平，唯有势能中的键结构变化影响辐射。由于辐射受限于相变时达到的极限势能，温度因此保持恒定。

变温相变

然而，并非所有相变均在恒温条件下进行。要实现恒温相变，改变分子间键所需的能量必须与改变系统温度的能量相互制衡。例如，冰融化时，输入的能量既用于破坏分子间键，又用于提升温度，二者相互竞争，导致温度保持不变。而氦的超流体相变则不同，该相变需要降低温度，另一方面破坏氦原子间的相互作用需要吸收能量，帮助降温。这两个过程不相矛盾，而是互相乘，导致相变过程中温度不断下降，从约2.6卡尔文降至2.17卡尔文^[37]。

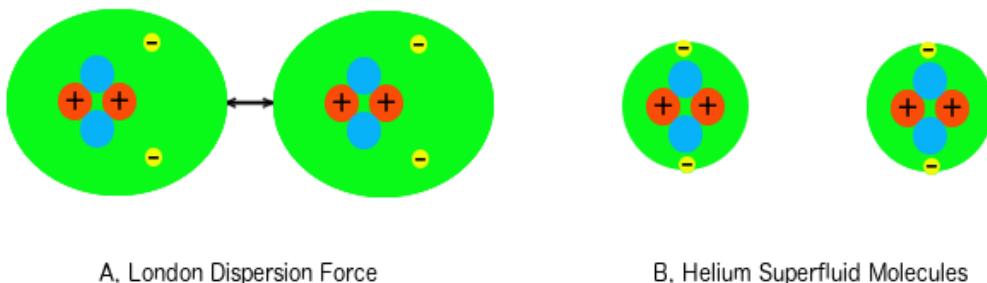


图3:超流体——无吸引力粒子的集合。A)高温时，氦分子间因伦敦色散力形成分子键。B)低温时，电子回落至较低轨道，伦敦色散力减弱，分子键消失。

氦原子间的相互作用来自伦敦色散力，如图3A所示。高温时，电子处于较高能级轨道，容易极化，产生较强的色散力。低温时，电子回退至较低能级，更紧密束缚于原子核，难以极化，色散力随之减弱^[38]。随着温度继续降低，这些作用逐渐消失，图3B显示，吸引力消失导致分子键消失。缺乏相互作用的氦原子得以自由运动，形成零粘度的超流体^[39]。本质上，超流体是一种由无相互作用、自由运动粒子组成的集合体。

氦的超流体相变发生在约2.17开尔文，称为 λ 点，实验中通常通过沸腾的突然停止来判断。气泡的形成依赖于表面张力，而表面张力又取决于分子间的相互作用力，因此气泡的消失意味着这些相互作用力的消失。虽然2.17开尔文常被认为是超流体相变的温度，但这一说法可能并不准确。

给液态氦降温时，伦敦色散力减弱，分子间键断裂。断裂过程吸收能量，进一步降低液体温度，因此相变不可能保持恒温，而是在一定温度区间内逐步完成。此区间可通过氦的比热曲线的曲率变化识别（见图4）。通常，在均质液体中，比热随能量释放自A点平滑下降，按理应从B点沿红线延续至D点。然而在B点出现明显偏离，B至C点比热急剧上升，反映液体内发生显著相变。

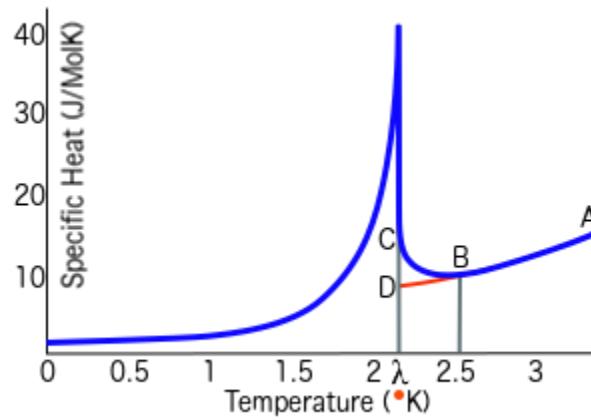


图4：氦-4超流体相变温度范围示意图。蓝色曲线显示了氦-4比热随温度的变化。曲线在B点至C点之间的曲率变化表明，相变过程早于约2.17开尔文的 λ 点开始。

λ 点左侧明显升高的比热表明，超流体相中的分子比普通液相中的分子具有更高比热。这种升高可能源于分子键破坏后能够自由运动的超流体分子，它们能够吸收更多动能，从而比热升高。因此， λ 点右侧比热的上升趋势暗示超流体分子的出现早于 λ 点，即比热曲线开始偏离的阶段即为相变的起始阶段。因此，超流体转变的起始温度应至少从B点开始，甚至可能更早。氦-4超流体相变的温度范围大致可视为从B点延伸至 λ 点。但由于相变初期曲率变化较为微弱，该范围的上限仍不够明确。

绝对零度的本质

绝对零度的概念最初由查理定律推导而来，该定律指出，在压强恒定的条件下，气体的体积与温度成正比^[40-41]。然而，绝对零度的物理实质至今尚不明朗，主要原因在于“温度”这一核心概念本身缺乏彻底了解。根据热力学第三定律，封闭系统在热力

学平衡下，当温度趋近绝对零度时，其熵将趋于某一最小恒值，此时系统被认为达到最低能量态。但这一“最低能量状态”具体意味着什么？

爱因斯坦的质能等价原理^[42]指出，能量不仅包括势能、动能和辐射能，还包括物质本身所具有的内在能量，其关系由质能方程($E = mc^2$)描述。若按照这一原理的字面意义理解，一个处于绝对最低能量状态的系统将不包含任何物质。换句话说，真正的绝对零度不仅意味着动能、势能和辐射能的完全消失，也意味着质量的完全消失。而困惑之处在于，目前缺乏对“最低能量状态”这一概念的准确定义。

有了上述对于“动态能”(dynamic energy)的认知，这一问题变得更加清晰。温度反映的是系统的辐射能水平，因此绝对零度应对应于辐射能的完全消失。然而，辐射能仅是系统动态能的三大组成部分之一，另两部分为动能和势能。这三者在系统内部持续转化，因此，只有当辐射能、动能与势能三者同时降至各自最低值时，系统才真正达到绝对零度^[33]。

比方说，对地表常见系统而言，绝对零度意味着三个条件的同时满足：系统没有任何辐射，分子原子运动或振动完全停止，以及所有各种粒子键均处于最低势能状态。在这一状态下，电子处于最低轨道，键长最短。但这并不意味着电子在基态轨道内的运动必须终止，因为这种内禀运动并不涉及能量交换，不会影响系统的温度。

此外，绝对零度还要求核子之间的势能达到最低。例如，含有放射性元素的系统不可能处于绝对零度，因为核衰变仍会持续释放辐射。同样需要强调的是，核势能的释放依赖于系统的物理条件。在木星，核势能虽存在，但因环境条件不足而无法释放；而在太阳中，极端高温高压使得核聚变得以自发进行，从而释放巨大的能量，产生极高温度。这也解释了为什么太阳与木星虽然都富含氢元素，却展现出截然不同的温度。

这个例子揭示了一个关键概念：“可释放的”动态能。即使两个系统包含相似的物质与潜在能量，其是否可以释放仍取决于是否具备触发机制。在太阳中，核势能可被有效激发并转化为热能；而在木星中，因质量与压力不足，这一能量形式保持“冻结”状态。根据爱因斯坦的质能等价原理^[42]，系统的总能量与其质量密切相关，其关系可用下式表示：

$$(7) \quad E = mc^2$$

其中，c表示光速，m表示系统的有效质量或等效质量。该原理表明，质量是能量的一种高度集中的形式，意味着系统的总能量不仅包括势能、动能和辐射能等动态能，还包括物质本身所蕴含的固有能量。由此，系统的总能量也可表示为动态能T与物质能量M的总和：

$$(8) \quad E = T + M.$$

物质能量M通常不参与动态相互作用，因此不会直接反映在温度测量中，但当它从物质中释放出来时，却会对温度产生影响。例如，氢中储存的势能在木星上仍以物质能量的形式存在，而在太阳中则转化为动态能。实际上，物质能量可以完全转化为其他能量形式。以正负电子湮灭为例，两个粒子的全部质量能量转化为纯辐射能。同样，任何基本粒子都能与其对应的反粒子发生湮灭，释放出物质的全部能量。反之，高能光子在原子核附近发生对生，产生电子-正电子对，体现了辐射能向物质能的转化。

这些例子凸显了区分物质能量与动态能的重要性。物质能量M代表物质内部固有的能量，而动态能T则指系统当前条件下可获得的动能、势能和辐射能等形式。这两者在系统条件允许时可以相互转换，体现了物理系统中能量转换的情境依赖性和动态性。因此，绝对零度可理解为动态能T完全耗尽，而物质能量M依然存在但无法释放的状态。

熵减现象

熵被定义为系统可及微观态数量的对数。如果一个系统共有N个可及微观态，则其熵可表示为：

$$(9) \quad S = k_B \ln(N)$$

其中， k_B 表示玻尔兹曼常数。这一定义被称为熵的统计定义。热力学定义则认为，系统熵的变化等于在可逆过程中从环境传入系统的无穷小热量除以传递时系统的瞬时温度。

虽然玻尔兹曼常常被认为建立了热力学定义与统计定义之间的等价性，但二者在本质上是不同的。这一区别在绝对零度下尤为明显：当系统仅处于一个微观态($N=1$)，即基态时，根据定义(9)熵为零；而根据热力学定义，当温度趋近于零时，其倒数趋于无穷，从而熵也趋于无穷。这种差异凸显了统计与热力学熵公式之间的根本不一致。

热力学第二定律断言熵永不减小^[43]，通常被视为普适原理。然而，这一假设值得重新审视。宇宙中系统的演化并非总是遵循第二定律所暗示的单向轨迹；它同样可以表现为周期性的振荡，例如单摆的摆动。此外，某些系统中熵确实可以减少，甚至在孤立条件下也会发生^[44]。通常，熵的增加出现在由排斥力主导的体系中；而在由吸引力支配的体系中，熵则可能减少。

熵减的一个例子是过冷水。过冷水是低于冰点但尚未凝固的液态水。当受到扰动时，水开始结冰，这一过程甚至可以在孤立环境中发生。随着水结成冰，会释放出热量——即分子间键形成所对应的势能。这部分热量被容器吸收，使容器升温。在这种情况下，热量从更冷的水流向更温暖的容器，与室温下冰在水杯中融化时的传热方向相反。由于分子运动的自由度被键合约束，从而减少了可及微观态数量，因此根据定义(9)，系统熵减小。

另一个例子是一个简单的孤立实验：在摄氏0度的水中加入初始温度低于摄氏0度的冰。随着冰升温至摄氏0度，部分水可能结冰。根据定义(9)，系统的总熵将减少，因为更多冰的形成限制了分子运动，减少了可及微观态数量。类似的熵减少也出现在乙酸钠的结晶过程中，这一过程可以在密封容器中发生，而无需与外界交换能量。同样，蜂蜜在封闭瓶中会缓慢析出糖晶体，也体现了熵的降低。

以上所有熵减的例子均表现在由吸引力驱动分子或微观结构的变化。除了库仑相互作用之外，引力同样能导致熵的减少。例如，生牛奶在静置时会分层：奶油上浮，脱脂乳下沉，这一过程从混合的高熵态转变为分层的低熵态。类似的密度分层现象也出现在混合油漆随时间沉降的情形中。在更大尺度上，引力塑造了天体的内部分层结构，如地球的地核与地幔。即便是大气，局部表现为充分混合的高熵气体，但在行星尺度上，引力作用下的大气仍会分层。

恒星、星系以及其他天体被认为起源于最初高度无序、具有大量可及微观态的巨大宇宙气体云。在引力作用下，这些气体云坍缩、聚集，形成更有秩序的结构，如行星、恒星、中子星和黑洞。观测证据表明，宇宙倾向于向越来越有序的结构演化，而非

走向传统意义上的“热寂”。为什么宇宙没有按照热力学第二定律的预测演化？答案并非宇宙演化尚未达到成熟阶段，而是第二定律并非人们通常认为的那种普适的根本原理。

更重要的是，第二定律并未揭示宇宙运行演化的根本特征，即能量的持续转化与再分配。这一特征更准确地体现在回归原理中^[44]。根据爱因斯坦的质能等价关系，宇宙中的一切存在本质上都是能量的不同形式，而物质本身则是能量的集中表现。因此，任何系统的演化都由其能量转化所驱动的。

这些转化展现出一种内在的平衡倾向，其特征是在给定总能量下，不同能量形态之间维持一种平衡比例。这样的平衡通过持续的转化而逐渐形成，并增强了系统的动态稳定性。它体现了相互竞争的内在驱动力之间的博弈，其中占主导地位的作用力引导能量再分配，在保持总能量守恒的同时尽量降低势能。通过这一过程，系统会建立或恢复能量的平衡分布，从而表现为渐进性的发展，或围绕平衡点的振荡。

由此，回归原理统一了熵增、熵减以及振荡三类行为，为宇宙演化提供了更为根本的理论框架。相比之下，经典熵概念强调能量的弥散，这一趋势在排斥相互作用主导的系统中成立，但在吸引相互作用占优的系统中则可能反转。因此，热力学第二定律仅刻画了自然过程中的一个有限子集，而非宇宙动态本质的全貌。

布朗运动的驱动力

牵牛花花粉在水中的布朗运动并非特例，而是在微观尺度下普遍存在的现象^[45]。爱因斯坦曾成功以随机游走模型对其进行统计建模，提出花粉粒的无规则运动源于与水中分子之间的随机碰撞。然而，尽管这一理论被广泛接受，其背后的真正机制至今仍未完全厘清。

为了验证该理论，我们可以估算：一颗水分子需要多大的速度，才能使花粉粒产生肉眼可见的布朗运动。假设一颗静止的花粉粒被一个以速度 v 运动的水分子撞击。为了最大限度估算动量转移，设该水分子发生完全弹性碰撞，并以相同速度反弹，从而将全部动量传递给花粉颗粒。水分子的质量约为 2.99×10^{-26} 公斤，该碰撞带来的动量变化为：

$$(10) \quad \Delta P_{water} = v \times 2 \times m = v \times 5.98 \times 10^{-26} \text{ 公斤}\cdot\text{米}/\text{秒}$$

牵牛花花粉直径通常为50–100微米。为保守估计，设其直径为40微米，对应体积约为 6.4×10^{-14} 立方米。由于其悬浮在水中，密度可近似为水的密度，即1,000公斤/立方米。设该花粉获得一个非常小的速度 3.0×10^{-7} 米/秒，该速度下单位时间位移小于可见光波长(380–750纳米)，应该是显微镜下肉眼可察觉的下限。换句话说，布朗当初观察到的花粉实际移动速度很可能高于这个阈值。在一次碰撞之后，花粉粒将获得大约 1.92×10^{-18} 公斤·米/秒的动量。这一动量应当等于撞击它的水分子所传递的动量：

$$(11) \quad v \times 5.98 \times 10^{-26} = 1.92 \times 10^{-18}$$

因此，若要将花粉推动至最低可观测的速度(3.0×10^{-7} 米/秒)，水分子的速度必须超过：

$$(12) \quad v = 3.21 \times 10^7 \text{ 米/秒}$$

这个速度已超过光速的10%。然而，室温下水分子的平均热运动速度约为590米/秒^[46]，而水中的声速约为1,500米/秒，可视为其理论上的上限。相比之下，空气分子的平均速度也不过1,200米/秒。考虑到水的黏性远高于空气，水分子的实际运动更为受限。因此，单个水分子若要以上述速度推动花粉粒，是完全不现实的。即使在最保守的估算下，该速度也远远超出物理可能性。由此可见，仅靠水分子的热运动来解释布朗运动，在物理上是不成立的^[47]。

相比之下，“跃迁冲击”的概念提供了一种更合理的解释^[30]。跃迁冲击指的是粒子间发生的剧烈、非均匀的能量交换，其力道远大于普通分子的热运动。当花粉粒与邻近水分子之间发生跃迁冲击时，会产生强烈的排斥力，从而有效推动粒子，使其出现可观测的随机运动。事实上，水分子的热运动本身就源于跃迁冲击。因此，无论是水分子还是花粉粒的布朗运动，其背后的真正驱动力都可以归因于跃迁冲击所引发的深层相互作用。

克鲁克斯辐射计的驱动机制

跃迁冲击理论为克鲁克斯辐射计的旋转现象提供了更具说服力的解释^[30]。该装置由一个低压玻璃球组成，内部装有一组安装在低摩擦主轴上的叶片^[48]。每个叶片一面为黑色，另一面为白色。当受到光照时，叶片开始旋转，黑色面背离光源，且旋转速度随光强增强而增加。这一现象的成因长期以来一直是个谜。其发明者威廉·克鲁克斯^[49]最初将旋转归因于麦克斯韦^[50]提出的光子压力。然而，这一解释存在两个致命问题：一是若由光压驱动，反射率更高的白色面应产生更大推力，导致叶片朝相反方向旋转；二是若光压有效，则旋转应在真空中最明显，然而事实恰恰相反，在高真空中叶片完全静止，反而在低压（约1帕）下旋转最快。

其他主流理论普遍将旋转归因于气体动力学效应，例如叶片两侧或边缘的气压差^[51-56]。然而，这些解释难以说明一个关键现象：旋转的快速启动，尤其是显著的最大初始加速度。根据牛顿第二定律，加速度需由较大的瞬时合力驱动。若旋转来自气压差形成的缓慢推动，启动加速度应从零开始逐渐增大。但实验显示，叶片一经照射便迅速启动，加速度在初始瞬间即达峰值，这与缓慢积累的气压模型相矛盾。

更值得注意的是冷却实验的结果。当辐射计被置于冰箱或接触蒸发酒精等冷源时，叶片会短暂反向旋转，即使此时系统正失去热量。在气体分子运动减缓、空气驱动力更弱的情况下，叶片仍能迅速启动旋转，这一行为显然无法用传统气体动力学解释。

跃迁冲击机制提供了更为合理的解释。当光线照射到叶片表面时，会激发电子跃迁并瞬间产生强烈的局部相互作用（即跃迁冲击），使邻近的空气分子受到排斥，并将动量传递给叶片，形成推动力。由于黑色面吸收光能更强，因此跃迁冲击作用的频率更大，造成两侧受力不平衡，从而推动叶片旋转。由于跃迁冲击响应即时，该机制预测：最大驱动力将在光照开始的瞬间产生，进而导致最大初始加速度。随着叶片旋转速度上升，空气阻力逐渐增大，导致加速度减小，最终达到动态平衡的恒定转速。

实验结果也印证了这一预测。如图5所示，红色曲线表明驱动力在照射初期迅速达到峰值，随后因空气阻力增加而逐渐减弱。最终，叶片进入稳态旋转。这些实验证据强有力地支持了跃迁冲击理论。

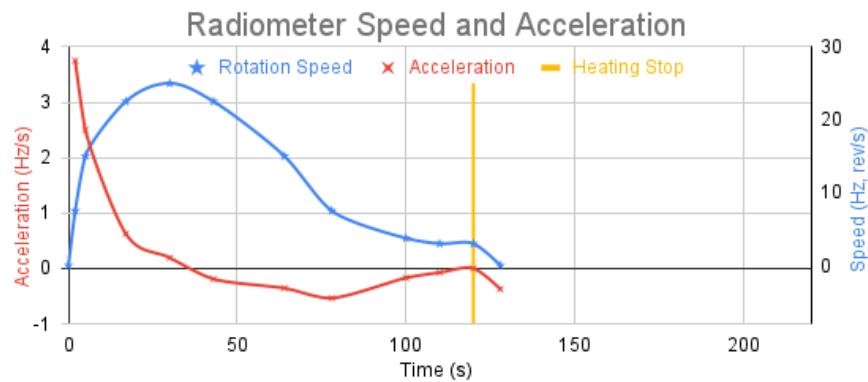


图5: 强光照实验中克鲁克斯辐射计的转速与加速度变化

跃迁冲击理论还预测，当光源移去时，辐射计会出现短暂的反向旋转。这是因为黑色面作为更高效的热辐射体，会比白色面更快地散发热量，导致冲力短暂锐减，从而产生反向驱动力。这一机制也能够解释在冷却实验中观察到的反向旋转现象，例如将辐射计置于冰箱内时的情况。值得一提的是，在微波加热实验中也记录到了快速的反向旋转：将辐射计在微波炉中加热数秒后迅速取出，反向旋转速度可达每秒7转。然而，此类微波实验存在安全隐患。第二次实验中，由于叶片连接处含金属，辐射计被烧毁，因此不建议自行尝试。幸运的是，已有相关微波加热过程的视频资料可供参考^[57]。

对电阻的常见错误认知

关于电阻的误解往往源自对粒子振动的根本误解，这也导致了对超导本质的困惑。当前主流理论大多基于德鲁德模型(Drude model)^[58]。该模型认为，金属中的原子通过金属键结合形成晶格结构，“自由电子海”在晶格间流动，从而产生电流。在此框架下，电阻被解释为自由电子与晶格中振动离子碰撞所致，每次碰撞都会扰乱电子运动并耗散能量，导致电阻产生。

按照这一观点，金属键负责维系金属晶体的内聚力。金属中，价电子脱离原子核，形成一个在正电原子核之间自由流动的电子海，这个电子海作为结合介质，将原子核粘合在一起。晶体结构的稳定性取决于金属键的强度。

然而，问题在于：如果电子海在电流流动时被“移除”，那么带正电的原子核会相互排斥，晶体结构应当崩解。电子海作为非局部的“粘合剂”，使得晶体如何保持稳定变得难以解释。

实际上，金属表现出高度的结构稳定性，能够承受较大的剪切和拉伸力，这表明传统的电子海和金属键模型可能存在不足。作为替代方案，我们认为压缩键(compression bonds)更合理：当原子靠近时，价电子云发生形变，导致电子密度在不同方向上分布不均，形成各向异性的局部电场，进而产生分子间的吸引力。这种压缩键也可能解释氦固体和金属氢中的内聚力。

此外，若德鲁德模型正确，随着压力增加，原子间距减小，电子与晶格碰撞应更频繁，电阻应升高。但实验结果恰恰相反，电阻率随压力升高而下降，显示压力与电阻率呈负相关^[59-61]。

广为接受的BCS(巴丁-库珀-施里弗)超导理论默认了传统电阻模型。BCS理论认为，电子在低温下通过与声子相互作用形成库珀对，减少电子振动，从而消除电阻，实现超导。然而，自1986年以来，发现了许多高温超导体，其临界温度远超BCS理论预测。且这些高温超导多出现在高压条件下，而BCS理论对压力促进超导的作用解释不足。这些差异表明，传统电阻理论的某些假设可能存在根本性问题。

电阻与超导的统一理论

现有理论在解释高压下的电阻率变化和超导现象时显得捉襟见肘，这并非偶然，而可能源于传统“碰撞机制”模型和“自由电子海”假设的根本性误导。这些错误观念可能长期束缚了研究思路，限制了理论突破和技术创新，尤其妨碍了对室温超导体的探索。为解决这些问题，我们提出一种统一理论框架，将电阻与超导归为同一物理机制下的不同表现形式^[62]。

该理论的核心观点是：导体中并不存在真正自由运动的电子。由于电子带负电，其运动受到量子态限制，通常被束缚在原子的价轨道上。只有当电子获得足够能量，才能跃迁至更高能态，并通过分子间共享的路径，称为“电子通道”，实现迁移。材料的导电性取决于这些电子通道的连通程度和电子跃迁所需的能量，即“能差”。能差越小，电阻越低；当能差为零时，材料表现为超导状态，电子得以无阻传输。

温度和压力是决定能差大小的关键因素。温度升高会导致热膨胀，使分子间距增大、能差扩大，从而提升电阻；温度降低则产生相反效应，最终在极低温下使能差趋近于零，形成超导态。同样，高压可压缩分子间距，缩小能差，从而降低电阻。这解释了为什么在高压条件下常常发现新的超导体；有时甚至能将原本的绝缘体转变为超导体。

在该模型下，绝缘体、导体与超导体不再是截然不同的材料类型，而是压力与温度调控下的不同“电阻状态”。三者的差异本质上来源于电子通道的结构连通性及其与价轨道之间的能差大小。

这一理论还为实现室温超导提供了方向：关键在于缩小分子间距。然而，分子间的排斥力构成了主要障碍。尽管高压可以强行压缩材料，但其应用受限。更具前景的策略是，通过分子结构设计，引入定向的分子间吸引力，实现自发压缩，从而在常温常压下实现零能差电子通道，为室温超导的实现提供理论基础和技术路径。

结论

粒子振动在诸多物理过程中被过度强调，导致了对温度本质、布朗运动以及电阻等与热力学密切相关现象的广泛误解。这些误解往往深植于传统理论体系之中，影响范围广泛，涉及多个科学与技术领域。正因如此，它们不仅在若干研究方向上阻碍了理论进展与技术突破，若不加以纠正，仍可能持续制约未来发展。随着“跃迁冲击”、“动态能”与“压缩键”等新概念的提出，这些长期存在的认知偏差正逐步被澄清。这一理论体系为多个经典难题提供了更为合理的解释，例如克鲁克斯辐射计的旋转机制、电阻的真正起因，以及超导现象的本质机制。更为重要的是，这些新观点不仅有助于厘清科学史上的诸多关键谜题，也为未来的科研探索与技术创新开辟了新的路径，特别是在室温超导材料的开发研究方面，展现出巨大的应用潜力和深远的科学意义。

版本更新

- 12/30/2022: 本文在斯坦福初始发布
- 11/02/2025: 在Zenodo上发表
- 12/18/2025: 增加相关文章摘要连接

相关文章摘要链接

- <https://cs.stanford.edu/people/zjl/abstractc.html>, [PDF](#)
- <https://sites.google.com/view/zjlc/>, [PDF](#)
- <https://xenon.stanford.edu/~zjl/abstractc.html>, [PDF](#)
- <https://doi.org/10.5281/zenodo.17972005>, [PDF](#)

相关文献

- 热力学中的错误概念 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 克鲁克斯辐射计旋转的驱动机制 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 布朗运动的原动力 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 温度是分子平均动能的标志吗? ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 绝对零度的本质 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 能量转换三角 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 热膨胀是由于粒子振动引起的吗? ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 超流体不是流体 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 为什么相变温度保持恒定 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 摩擦为何会产生热量? ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 简明熵概念 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 熵可以减少 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 回归原理 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 金属中是否存在自由电子海? ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 电子通道: 导体超导统一论 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 低温和高温超导统一理论 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- LK-99的局限和意义 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 地球磁场超导起源说 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 关于质量的本质问题 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 从万有引力定律到广义相对论的演化 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 爱因斯坦质能方程的最简单推导 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))

- [如何理解相对论 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [数学并非科学 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [潮汐能并非可再生能源 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [AI 知识污染 \(PDF\) \(中文\)](#)
- [DeepSeek pk ChatGPT \(PDF\) \(中文\)](#)

参考文献

1. Bardeen, J.; et al. (1957). "Theory of Superconductivity". *Physical Review*. **108**. p. 1175. doi:[10.1103/physrev.108.1175](https://doi.org/10.1103/physrev.108.1175).
2. Bednorz, J.G. & Müller, K.A. (1986). "Possible high T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System". *Z. Phys. B*. **64** (1): 189–193. doi:[10.1007/BF01303701](https://doi.org/10.1007/BF01303701).
3. Wu, M.K.; et al. (1987). "Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure". *Physical Review Letters*. **58** (9): 908–910. doi:[10.1103/PhysRevLett.58.908](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.908). PMID [10035069](#).
4. Drozdov, A.; et al. (2015). "Conventional Superconductivity at 203 Kelvin at High Pressures in the Sulfur Hydride System". *Nature*. **525** (2–3): 73–76. arXiv:[1506.08190](#).
5. Schilling, A.; et al. (1993). "Superconductivity above 130 K in the Hg–Ba–Ca–Cu–O System". *Nature*. **363** (6424): 56–58. doi:[10.1038/363056a0](https://doi.org/10.1038/363056a0).
6. Takahashi, H.; et al. (2008). "Superconductivity at 43 K in an Iron-based Layered Compound $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ ". *Nature*. **453** (7193): 376–378. doi:[10.1038/nature06972](https://doi.org/10.1038/nature06972). PMID [18432191](#).
7. Eremets, M.I.; et al. (2022). "High-Temperature Superconductivity in Hydrides: Experimental Evidence and Details". *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. **35** (4): 965–977. arXiv:[2201.05137](#). doi:[10.1007/s10948-022-06148-1](https://doi.org/10.1007/s10948-022-06148-1).
8. Tuckerman, M.E. (2010). "Statistical Mechanics: Theory and Molecular Simulation". (1st ed.). P. 87. ISBS [978-0-19-852526-4](#).
9. De Podesta, M.; et al. (2013). "A Low-uncertainty Measurement of the Boltzmann Constant". *Metrologia*, **50** (4): S213-S216, BIPM & IOP Publishing Ltd.
10. Krönig, A. (1856). "Grundzüge einer Theorie der Gase". *Annalen der Physik und Chemie* (in German). **99** (10): 315–22. Bibcode:[1856AnP...175..315K](#). doi:[10.1002/andp.18561751008](https://doi.org/10.1002/andp.18561751008). [Facsimile at the Bibliothèque nationale de France \(pp. 315–22\)](#).
11. Clausius, R. (1857). "Über die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen". *Annalen der Physik und Chemie* (in German). **176** (3): 353–79. Bibcode:[1857AnP...176..353C](#). doi:[10.1002/andp.18571760302](https://doi.org/10.1002/andp.18571760302). [Facsimile at the Bibliothèque nationale de France \(pp. 353–79\)](#).
12. Maxwell, J.C. (1875). "The Question of the Atom". *J. Chem. Soc.* (London), Facsimile published in Mary Jo Nye, **1875** (28): 493-508.
13. Reif, F. (1965). "Fundamentals of Statistical and Thermal Physics". *McGraw-Hill*, New York.
14. Carey, V. (1999). "Statistical Thermodynamics and Microscale Thermophysics". Cambridge University Press.
15. Goldstein, H. (1980). "Classical Mechanics". (2nd edition). Addison-Wesley.

16. Mayhew, K.W. (2017). "A New Perspective for Kinetic Theory and Heat Capacity". *Prog. in Phys.*, **13** (3): 165-173.
17. Boltzmann, L. (1895). "On Certain Questions of the Theory of Gases". *Nature*, **51** (1322): 413-415.
18. Planck M. (1901). "On the Law of the Energy Distribution in the Normal Spectrum". *Ann. Phys.*, **4** (553): 1-11.
19. Einstein, A. and Stern, O. (1913). "Some Arguments for the Assumption of Molecular Agitation at Absolute Zero". *Ann. Phys.*, **40** (551) 551-560.
20. Thomson, W. (1904). "Historical and Philosophical Perspectives". *Baltimore Lectures*. Baltimore: Johns Hopkins University Press. Sec. 27.
21. Rayleigh, J.W.S. (1900). "The Law of Partition of Kinetic Energy". *Phil. Mag.*, **49**: 98–118.
22. Pais, A. (1982). "Subtle is the Lord". Oxford University Press. Oxford UK.
23. Armin, H. (1971). "The Genesis of Quantum Theory (1899–1913)". Translated by Claude W. Nash, ed., Cambridge, MA.
24. Liu, J.Z. (2023). "[Can Temperature Represent Average Kinetic Energy?](#)" Stanford University. Archived ([PDF](#)). doi:[10.5281/zenodo.17503871](https://doi.org/10.5281/zenodo.17503871).
25. Planck, M. (1914). "The Theory of Heat Radiation". *Masius, M. (transl.)* (2nd ed.). P. Blakiston's Son & Co. OL [7154661M](#).
26. Planck, M. (1915). "Eight Lectures on Theoretical Physics". *Wills, A. P. (transl.)*. Dover Publications.
27. Draper, J.W. (1847). "On the Production of Light by Heat". *London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, series 3, **30**: 345–360.
28. Narimanov, E.E.; Smolyaninov, I.I. (2012). "Beyond Stefan–Boltzmann Law: Thermal Hyper-Conductivity". *Conference on Lasers and Electro-Optics 2012*. OSA Technical Digest. Optical Society of America. pp. QM2E.1. doi:[10.1364/QELS.2012.QM2E.1](https://doi.org/10.1364/QELS.2012.QM2E.1).
29. Knizhnik, K. (2016). "[Derivation of the Stefan–Boltzmann Law](#)". Johns Hopkins University – Department of Physics & Astronomy.
30. Liu, J.Z. (2019). "[The Process Driving Crookes Radiometers](#)". Stanford University. Archived ([PDF](#)). doi:[10.5281/zenodo.17503377](https://doi.org/10.5281/zenodo.17503377).
31. Vijay, R.; et al. (2011). "Observation of Quantum Jumps in a Superconducting Artificial Atom". *Physical Review Letters*. **106** (11): 110502. arXiv:[1009.2969](https://arxiv.org/abs/1009.2969). doi:[10.1103/PhysRevLett.106.110502](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.110502). PMID [21469850](#).
32. Itano, W.M.; et al. (2015). "[Early Observations of Macroscopic Quantum Jumps in Single Atoms](#)". *International Journal of Mass Spectrometry*. **377**: 403. doi:[10.1016/j.ijms.2014.07.005](https://doi.org/10.1016/j.ijms.2014.07.005).
33. Liu, J.Z. (2023). "[The Nature of Absolute Zero Temperature](#)". Stanford University. Archived ([PDF](#)). doi:[10.5281/zenodo.17504015](https://doi.org/10.5281/zenodo.17504015).
34. Liu, J.Z. (2023). "[Is Thermal Expansion Due to Particle Vibrating?](#)" Stanford University. Archived ([PDF](#)). doi:[10.5281/zenodo.17504268](https://doi.org/10.5281/zenodo.17504268).
35. Liu, J.Z. (2023). "[Why Phase Transition Temperature Remains Constant](#)". Stanford University. Archived ([PDF](#)). doi:[10.5281/zenodo.17504663](https://doi.org/10.5281/zenodo.17504663).
36. Einstein, A. (1993). "[The Collected Papers of Albert Einstein. 3](#)". English translation by Beck, A. Princeton University Press.
37. Liu, J.Z. (2021). "[Superfluids Are Not Fluids](#)". Stanford University. Archived ([PDF](#)). doi:[10.5281/zenodo.17504327](https://doi.org/10.5281/zenodo.17504327).

38. Leite, F. L.; et al. (2012). "Theoretical models for surface forces and adhesion and their measurement using atomic force microscopy". *International Journal of Molecular Sciences*. **13** (12), 12773–856. doi:[10.3390/ijms131012773](https://doi.org/10.3390/ijms131012773). PMC [3497299](#). PMID [23202925](#).
39. Kapitza, P. (1938). "Viscosity of liquid helium below the λ -point". *Nature*. **141** (3558), 74. Bibcode:[1938Natur.141...74K](#). doi:[10.1038/141074a0](https://doi.org/10.1038/141074a0). S2CID [3997900](#).
40. Gourgy, J.B. (1979), "Charles the Obscure". *Isis* **70** (254): 576–579.
41. Gay-Lussac, J.L. (1802), "Recherches sur la Dilatation des gaz et des Vapeurs". *Annales de Chimie*, **XLIII**: 137. [English translation \(extract\)](#).
42. Einstein, A. (1905), "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", *Annalen der Physik* (in German), **322** (10): 891–921, Bibcode:[1905AnP..322..891E](#), doi:[10.1002/andp.19053221004](https://doi.org/10.1002/andp.19053221004) ([English translation](#)).
43. Dugdale, J.S. (1996). "Entropy and Its Physical Meaning". *Taylor & Francis*. p. [13](#). ISBN [978-0-7484-0569-5](#).
44. Liu, J.Z. (2025). "[Entropy Can Decrease](#)". *Stanford University*. Archived ([PDF](#)). doi:[10.5281/zenodo.17504814](https://doi.org/10.5281/zenodo.17504814).
45. Tsekov, R. (1995). "Brownian Motion of Molecules: the Classical Theory". *Ann. Univ. Sofia*. **88**: 57. arXiv:[1005.1490](#). Bibcode:[1995AUSFC..88...57T](#). The behavior of a Brownian particle is quite irregular and can be described only in the frames of a statistical approach.
46. Vertical Learning Labs. (2011). "[Molecular Speed Distribution](#)". Introduction to Chemistry, Unit 1.5.
47. Liu, J.Z. (2019). "[The Cause of Brownian Motion](#)". *Stanford University*. Archived ([PDF](#)). doi:[10.5281/zenodo.17503671](https://doi.org/10.5281/zenodo.17503671).
48. Gibbs, P. (1996). "[How Does a Light-Mill Work?](#)" *Usenet Physics FAQ*. Retrieved 8 August 2014.
49. Crookes, W. (1874). "[On Attraction and Repulsion Resulting from Radiation](#)". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. **164**: 501–527. doi:[10.1098/rstl.1874.0015](https://doi.org/10.1098/rstl.1874.0015).
50. Maxwell, J.C. (1879). "[On Stresses in Rarefied Gases Arising from Inequalities of Temperature](#)". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. **170**: 231–256. doi:[10.1098/rstl.1879.0067](https://doi.org/10.1098/rstl.1879.0067).
51. Worrall, J. (1982), "The Pressure of Light: The Strange Case of the Vacillating 'Crucial Experiment'". *Studies in History and Philosophy of Science*, **13** (2): 133–171, doi:[10.1016/0039-3681\(82\)90023-1](https://doi.org/10.1016/0039-3681(82)90023-1).
52. Brush, S.G.; Everitt, C.W.F. (1969). "[Maxwell, Osborne Reynolds, and the Radiometer](#)". *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 1, 1969, pp. 105–125.
53. Han, L.H.; et al. (2010). "[Light-Powered Micromotor Driven by Geometry-Assisted, Asymmetric Photon-heating and Subsequent Gas Convection](#)". *Applied Physics Letters*. **96** (21): 213509(1–3). doi:[10.1063/1.3431741](https://doi.org/10.1063/1.3431741).
54. Kraftmakher, Y. (2014). *Experiments and demonstrations in physics* (2nd ed.). Singapore: World Scientific. p. 179. ISBN [9789814434904](#).
55. Yarris, L. (2010). "[Nano-Sized Light Mill Drives Micro-sized Disks](#)". *Physorg*. Retrieved 6.
56. Osborne, R. (1879). "On Certain Dimensional Properties of Matter in the Gaseous State". *Royal Society Phil. Trans.*, Part 2.
57. Jaynes, R. (2019). "[Radiometer in the Microwave](#)". YouTube channel [@jaynesnetwork](#), <https://www.youtube.com/watch?v=OGX0-C1FXYA>.
58. Drude, P. (1900). "[Zur Elektronentheorie der Metalle](#)". *Annalen der Physik*. **306** (3): 566–613. doi:[10.1002/andp.19003060312](https://doi.org/10.1002/andp.19003060312).

59. Machado, A.; et al. (2012). "[Defect Structure Versus Superconductivity in MeB₂ Compounds \(Me = Refractory Metals\) and One-Dimensional Superconductors](#)", doi:10.5772/48625.
60. Vaidya, R.; et al. (2003). "[Effect of Pressure on Electrical Resistance of WSe₂ Single Crystal](#)". *Pramana -- Journal of Physics*, Vol. 61, No. 1, pp. 183-186.
61. Souza, E.; et al. (2006). "[Improvement of Metallic Joint Electrical Conductivity Using a Novel Conductive Paste Produced from Recycled Residues](#)". *Rev. Esc. Minas* Vol. 59, No. 2.
62. Liu, J.Z. (2019). "[Unified Theory of Low and High-Temperature Superconductivity](#)". *Stanford University*. Archived ([PDF](#)). doi:[10.5281/zenodo.1750766](https://doi.org/10.5281/zenodo.1750766).